**Capítulo 1**

**Características nutricionales e impacto ambiental de los coproductos de proteína fermentada de maíz**

# Introducción

Uno de los mayores desafíos que enfrenta la sociedad global actual es la producción de alimentos sustentables, nutritivos, inocuos y asequibles para una población mundial que sigue en crecimiento (Shurson, 2017). Una alimentación mundial sustentable requiere del desarrollo y adopción de innovaciones para mejorar la eficiencia nutricional de la producción de alimentos y al mismo tiempo manejar el uso de la tierra cultivable, conservar la disponibilidad y calidad del agua, proteger los ecosistemas y la biodiversidad, además de mitigar los efectos del cambio climático (Shurson, 2017). La mayor competencia por los granos y oleaginosas entre biocombustibles, alimentos para consumo humano y la producción animal ha llevado a cuestionarnos sobre la sustentabilidad a largo plazo de la utilización de estos recursos para la producción de biocombustibles (Shurson, 2017). Sin embargo, el uso de los coproductos de biocombustibles en alimentos balanceados contribuye a la sustentabilidad ambiental de la producción de animales para consumo humano, porque la conversión de los cultivos alimentarios en biocombustibles y coproductos resulta en una pérdida de eficiencia energética general de solo 1% a 2.5% (Lywood y Pinkney, 2012). Dado que solo el almidón y otras fracciones de carbohidratos fermentables del maíz se convierten en etanol, los coproductos concentran la proteína cruda (PC), aceite, fibra y cenizas restantes. Por lo tanto, el uso de los coproductos de maíz en alimentos balanceados es una forma eficiente de conservar y utilizar estas fuentes concentradas de energía y nutrientes para producir carne, leche y huevo a un bajo costo y de manera sustentable.

Con el paso del tiempo, la producción de etanol y de coproductos en Estados Unidos ha cambiado y se ha incrementado de forma espectacular. La producción de coproductos de maíz comenzó en el siglo XIX en las destilerías de bebidas alcohólicas (por ejemplo, las de whisky) que usaban maíz como principal materia prima, con cuyos granos húmedos de destilería resultantes se alimentaba al ganado lechero y de engorde de las granjas cercanas (Shurson et al., 2012). Hasta la década de los 50, los granos húmedos de destilería se consideraban primordialmente como un ingrediente de proteína utilizados para sustituir en parte otros ingredientes proteínicos, casi en exclusiva como alimento para ganado. De hecho, hasta finales de los 90 muy pocos coproductos de granos de destilería de maíz eran utilizados en dietas avícolas y porcinas (Shurson et al., 2012). En los años 70 y 80 se construyeron grandes plantas de molienda en húmedo para producir el etanol suficiente para considerar su utilización como aditivo de la gasolina (Shurson et al., 2012). El proceso de molienda en húmedo separa el almidón y el aceite de maíz para consumo humano y otras aplicaciones industriales, para dejar a un lado las fracciones de proteína y fibra. Los coproductos de maíz resultantes de los procesos de molienda en húmedo son la harina de gluten de maíz, el *gluten feed* y la harina de germen de maíz. La harina de germen de maíz y la harina de gluten de maíz se secan y se han vuelto ingredientes altos en proteína de gran popularidad en las dietas avícolas, en parte debido a sus pigmentos concentrados (xantofilas) que proporcionan color natural a la yema del huevo y la piel del pollo. En contraste, el *gluten feed* por lo general se comercializa en granjas lecheras y de ganado de engorde como un coproducto húmedo, dado que estas especies de animales de granja son capaces de utilizar mejor el alto contenido de fibra de este coproducto. Por otro lado, durante la década de los 90 y la primera del siglo XXI, se construyeron muchas plantas de etanol de molienda en seco propiedad de productores agrícolas para producir grandes cantidades de etanol a fin de cumplir la creciente demanda del mercado de uso de etanol como agente oxigenante de la gasolina (Shurson et al., 2017). Esto ocasionó que hoy en día haya más de 200 plantas de etanol de molienda en seco que producen cerca de 38 millones de toneladas de coproductos de destilería, que consisten en granos húmedos y secos de destilería con o sin solubles, y aceite de destilería de maíz (CDO). Se han utilizado dos procesos principales y algunos de menor importancia de producción de etanol y coproductos, que han resultado en distintos perfiles de nutrientes de coproductos de maíz. Al mismo tiempo, se ha llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones en nutrición animal para expandir el uso de los granos secos de destilería con solubles (DDGS) en dietas avícolas, porcinas y acuícolas en los mercados tanto nacionales como de exportación. Los consiguientes esfuerzos educativos proporcionados por investigadores líderes de DDGS resultó en un uso mucho mayor en dietas porcinas y avícolas en EE. UU., además de que los consultores de nutrición del U.S. Grains Council fueron decisivos para ayudar a forjar la demanda de este coproducto en el mercado de exportaciones, al que se exportan alrededor de 11 millones de toneladas al año a más de 60 países.

La separación del aceite de maíz del destilado ligero después de la fermentación comenzó hacia 2005, lo cual redujo el contenido de aceite (grasa cruda) de los DDGS y alteró sustancialmente su perfil de nutrientes. La disminución del contenido de aceite de los DDGS generó preocupaciones sobre su uso constante en las dietas porcinas y avícolas con base en el supuesto de que disminuía el contenido de energía metabolizable (EM). Para ayudar a los usuarios de DDGS a manejar la variabilidad cada vez mayor del contenido de energía y aminoácidos digestibles entre las fuentes con cantidades variables de aceite de maíz (de 4 a 13%), los investigadores en nutrición porcina y avícola comenzaron a desarrollar ecuaciones de predicción de EM y aminoácidos digestibles para calcular con precisión estos componentes esenciales en las fuentes específicas del coproducto utilizadas en las formulaciones de alimento. En la actualidad, casi todas las plantas de etanol de EE. UU. producen DDGS reducidos en aceite y los mercados nacionales y de exportación siguen usándolos en las dietas de ganado lechero y de engorde, porcinas, avícolas y acuícolas. La cuarta edición del Manual del Usuario de DDGS del U.S Grains Council, publicado en 2018, brinda un excelente resumen del valor alimenticio de los DDGS reducidos en aceite para todas las especies de animales para la producción de alimentos.

La optimización de la eficiencia de convertir el almidón en etanol ha dado como resultado que varias plantas de procesamiento sigan un proceso evolutivo similar al de las industrias de molienda en húmedo y de procesamiento de oleaginosas, en los que se concentran los nutrientes en los coproductos para mejorar su valor nutricional y usarlos en alimentos balanceados. Dichas tecnologías implican la separación de la fibra del maíz ya sea antes o después de la fermentación, para concentrar la proteína y la levadura, y eliminar las cantidades variables de aceite para la producción de nuevos tipos de coproductos denominados proteínas fermentadas de maíz (PFM). Los tres principales proveedores de estas nuevas tecnologías patentadas para la producción de coproductos de proteínas fermentadas de maíz son ICM, Inc., Fluid Quip Technologies y Marquis Energy. Estos coproductos de proteínas fermentadas de maíz tienen mucho mayor contenido de proteína cruda (> 50%) que los DDGS convencionales reducidos en aceite (~ 27% PC), con un contenido estimado de levadura residual de 20 a 29%. Los perfiles de energía y nutrientes digestibles de los coproductos de proteínas fermentadas de maíz son también sustancialmente diferentes de los de las fuentes de granos secos de destilería altos en proteína (HP-DDG; de 36 a 48% PC) que hay en el mercado. El concentrado de proteína de maíz (CPC) contiene la mayor cantidad de PC (>67%) y la menor de aceite (0.5%) de todos los coproductos de maíz y se produce mediante procesos de molienda de este grano en húmedo claramente diferentes a los utilizados en las plantas de etanol de molienda en seco para la producción de proteínas fermentadas de maíz y HP-DDG. Debido a los distintos tipos de coproductos de maíz altos en proteína disponibles en el mercado nacional y de exportación en la actualidad, no es de sorprenderse que a menudo quienes los compran se confundan con la terminología y sus diferentes características nutricionales. Por lo tanto, el propósito de este y de los capítulos 2, 3, 4 y 5 es describir el valor nutricional y las aplicaciones de los coproductos de proteínas fermentadas de maíz (PFM) en las dietas acuícolas, avícolas, porcinas y de ganado lechero, respectivamente. El capítulo 6 proporciona un resumen de las composición nutricional y aplicaciones en alimentación de las fuentes de HP-DDG, mientras que el capítulo 7 es un resumen de las aplicaciones en alimentación del concentrado de proteína de maíz (CPC) en dietas acuícolas y avícolas. Por último, el capítulo 8 es un resumen de los perfiles nutricionales y estudios de alimentación con el uso de otros coproductos de maíz, como el salvado de maíz con solubles (SMD), DDGS desgrasados y aceite de maíz.

# Cómo entender la proteína cruda y los aminoácidos en los coproductos de maíz

A primera vista, los ingredientes de alimentos balanceados que contienen altas concentraciones de PC resultan atractivos para su uso en todos los alimentos para animales ya que la proteína cruda (aminoácidos) es el segundo componente más caro en las dietas después de la energía, y a menudo se requieren cantidades relativamente bajas de ingredientes altos en PC para cubrir los requerimientos de aminoácidos del animal. Sin embargo, aunque por lo general se siguen utilizando la proteína cruda, grasa y fibra crudas en la cotización y comercialización de los ingredientes para alimentos balanceados de todo el mundo, su valor nutricional y económico real no se basa en estas mediciones nutricionales. En cambio, los determinantes clave del valor nutricional y económico real son el contenido de energía metabolizable (EM) o energía neta (EN), de aminoácidos y de fósforo digestible. El contenido de PC de un ingrediente de alimentos balanceados se determina midiendo el contenido de nitrógeno y multiplicando dicha concentración por un factor constante de 6.25, que es el inverso del contenido medio ponderado de nitrógeno del 16% en proteínas (Shurson et al., 2021). El nitrógeno es uno de los componentes químicos que forman los aminoácidos, los ladrillos constructores de las proteínas y se usa como indicador para calcular el contenido de proteína de los ingredientes. No obstante, la precisión de usar este método universal para calcular las concentraciones reales de proteínas intactas no es suficiente para conseguir el uso óptimo de los aminoácidos (proteína) en el alimento balanceado, porque varían los perfiles de dichos aminoácidos y algunos ingredientes contienen concentraciones relativamente altas de compuestos de nitrógeno no proteico (por ejemplo, ácidos nucleicos y nucleótidos, algunas vitaminas, aminas, amidas y urea) que no son proteínas. Además, la PC no proporciona información de las concentraciones, proporciones, digestibilidad y biodisponibilidad de aminoácidos, información que se necesita en la formulación de la dieta (Shurson et al., 2021).

La harina de soya (HS) se utiliza por lo general como referencia estándar o “estándar de oro” de los ingredientes altos en proteína (de 44 a 48% de PC), ya que contiene altas concentraciones de todos los aminoácidos esenciales altamente digestibles (del 85 al 95%) y en proporciones equilibradas con relación a los requerimientos de aminoácidos en cerdos, aves y peces al combinarla con una fuente de energía a base de granos. Comparada con la proteína de soya, la proteína de maíz tiene un contenido de lisina (Lys) relativamente bajo, por lo que se le considera el primer aminoácido limitante (más propenso a ser deficiente) en las dietas de animales monogástricos. La relación de lisina a PC en los coproductos de maíz (de 2.8 a 4) es mucho menor que en la harina de soya (6.2). Como resultado, al añadir coproductos de maíz (como DDGS, HP-DDG o proteínas fermentadas de maíz) a las dietas porcinas, avícolas y acuícolas como sustituto parcial de la harina de soya, normalmente se requiere de L-lisina HCI cristalina suplementaria y otros aminoácidos sintéticos para cubrir los requerimientos de aminoácidos digestibles de los animales monogástricos. Además, por lo general la digestibilidad de la lisina en los coproductos de maíz (es decir, DDGS – 65%) es sustancialmente menor que en la harina de soya (90%) para cerdos, aves y peces. Debido a que las dietas porcinas y avícolas se formulan con base en aminoácidos digestibles, los ingredientes con cantidades menores de lisina digestible (como los DDGS) se deben añadir en cantidades mayores para cubrir los requerimientos de aminoácidos digestibles de los animales, o suplementar con aminoácidos cristalinos (como L-Lisina HCI) que es casi 98% digestible. El mismo principio se aplica a otros aminoácidos esenciales como treonina (Thr), triptófano (Trp), metionina (Met), valina (Val) e isoleucina (Ile) que por lo general son menos digestibles en los coproductos de maíz (como DDGS – 73 a 82%) que en la harina de soya (de 85 a 91%) en animales monogástricos.

Comparado con la harina de soya, los coproductos de maíz tienen mucho mayor contenido de fibra (fibra neutrodetergente – FND, fibra total dietética – FTD), lo cual se ha demostrado que aumenta la masa intestinal y secreción de mucina en el tubo intestinal de los cerdos. La treonina es el principal aminoácido que comprende a las células epiteliales del intestino y la mucina, lo que conduce a un aumento de pérdidas endógenas de este aminoácido si se alimenta a los cerdos con dietas altas en fibra. Debido a que las proteínas de mucina se digieren mal y los aminoácidos no se reabsorben, debe añadirse L-Thr sintética a las dietas porcinas con > 10% de coproductos de maíz para compensar dicho aumento en la pérdida de treonina y optimizar el desempeño de crecimiento (Mathai et al., 2016; Wellington et al., 2018). No está claro si estas respuestas suceden en aves y peces, pero es probable que sí, por lo que puede ser necesaria la suplementación de L-Thr en las dietas avícolas y acuícolas con tasas de inclusión moderadamente altas de coproductos de maíz para optimizar el desempeño del crecimiento y la composición de la canal.

La leucina (Leu) es el aminoácido más abundante tanto en la harina de soya (3.62%) como en los coproductos de maíz (por ejemplo, en los DDGS = 5.30%), pero la relación de leucina a lisina en la proteína de maíz es excesiva, con respecto a los requerimientos de cerdos, aves y peces. Las consecuencias del exceso de leucina se hacen más relevantes a medida que aumentan las tasas de inclusión de los coproductos de maíz en la dieta. El exceso de leucina aumenta el catabolismo de isoleucina y valina (otros dos aminoácidos de cadena ramificada, BCAA por sus siglas en inglés), ya que estos aminoácidos tienen una estructura molecular y rutas metabólicas similares. Por ende, a medida que la harina de soya es total o completamente sustituida añadiendo más de 20% de coproductos de maíz altos en PC en las dietas porcinas, se debe agregar L-Val y L-Ile sintéticos para compensar los efectos negativos del exceso de leucina (Cemin et al., 2019a,b; Kwon et al., 2019; Kwon et al., 2020; Siebert et al., 2021; Zheng et al., 2016). Sin embargo, no se han definido bien las proporciones óptimas de valina a lisina y de isoleucina a lisina digestibles en las dietas porcinas, avícolas y acuícolas. Hay evidencias similares de la necesidad de manejar el equilibrio de BCAA en las dietas avícolas (Waldroup et al., 2002; Peganova y Eder, 2003; Erwan et al., 2008; Ospina-Rojas et al., 2017; Soares et al., 2019), pero poco se sabe sobre el papel que desempeña en las dietas acuícolas el exceso de leucina y el equilibrio de los BCAA.

Comparado con la leucina, las concentraciones de triptófano en los coproductos de maíz son las más bajas de todos los aminoácidos esenciales. A pesar del requerimiento relativamente bajo en cerdos y aves, el triptófano desempeña varios papeles fisiológicos importantes como la síntesis de proteína del tejido magro corporal, regula la respuesta inmunitaria y es precursor de la serotonina, la cual regula el apetito y el estrés. No obstante, para apoyar la producción óptima de serotonina, se deben transportar cantidades adecuadas de triptófano a través de la barrera hematoencefálica. Desafortunadamente, el triptófano compite con los grandes aminoácidos neutrales (isoleucina, leucina, fenilananina, tirosina y valina) por el transporte a través de la barrera hematoencefálica. Los aminoácidos neutrales excesivamente grandes (como la leucina) disminuyen las concentraciones de serotonina, lo cual indica que la suplementación con L-Trp en las dietas porcinas puede superar la disminución en consumo de alimento ocasionada por el exceso de leucina como consecuencia del aumento de la tasa de inclusión de coproductos de maíz altos en PC (Salyer et al., 2013; Kwon et al., 2019; Cemin et al., 2020; Kerkaert et al., 2021; Clizer, 2021). Aunque no se ha establecido una relación ideal de triptófano digestible a lisina en las dietas porcinas de coproductos de maíz, los resultados de investigaciones indican que debe ser mayor que las recomendaciones actuales del NRC (2012). Es probable que para optimizar el crecimiento y las características de la canal, deban tenerse consideraciones similares de aumentar el contenido de triptófano en las dietas avícolas y acuícolas con altas cantidades de coproductos de maíz altos en PC.

# Contenido de levadura de los coproductos de maíz

Una de las características que diferencia a los coproductos de proteínas fermentadas de maíz del resto de los coproductos de maíz es que contienen entre 20 y 29% de levadura residual (*Saccharomyces cerevisiae*), lo cual es sustancialmente mayor que el estimado de 7 a 10% de las fuentes de DDGS convencionales (Shurson, 2018). Sin embargo, es importante destacar que la levadura residual residual en la proteínas fermentadas de maíz no es una forma viable que le permita funcionar como un microbiano alimentado directamente (DFM) o probiótico en los alimentos para animales, como los productos de levadura viables como la levadura seca activa. No obstante, en ciertos estudios los componentes de la pared celular de la levadura (oligosacáridos mananos, nucleótidos y β-glucanos) han demostrado que proporcionan beneficios a la salud al alimentarse a los animales (Shurson, 2018). La prohibición en muchos países del uso de antibióticos como promotores de crecimiento en el alimento balanceado ha generado gran interés por identificar ingredientes “funcionales” con compuestos que brinden beneficios a la salud a animales destinados a producir alimentos (Shurson et al., 2021). Ha habido una cantidad extensa de investigaciones realizadas en años recientes para evaluar la efectividad, magnitud y consistencia de mejores respuestas al desempeño del crecimiento al añadir diversas alternativas de aditivos no antibióticos para alimentos, como las levaduras viables (Vohra et al., 2016) como microbianos alimentados directamente (DFM; probióticos) y derivados de la pared celular de la levadura, como los oligosacáridos mananos, nucleótidos y β-glucanos (Shurson, 2018). Por lo tanto, estos componentes de la pared celular de la levadura representan una de las posibles características de valor agregado al usar coproductos de proteínas fermentadas de maíz en el alimento balanceado. Desafortunadamente, la eficacia y la consistencia en el crecimiento y las respuestas en materia de salud al añadir formas concentradas de oligosacáridos mananos, nucleótidos y β-glucanos al alimento balanceado han sido decepcionantes.

Aunque los resúmenes de los resultados de más de 733 estudios publicados que evaluaron los efectos de alimentar a mascotas, caballos, conejos, aves, cerdos, terneros y varias especies acuícolas con oligosacáridos mananos generalmente han mostrado mejoras en las tasas de crecimiento y conversión alimenticia junto con reducciones en mortalidad, las respuestas no han sido consistentes (Spring et al., 2015). En el caso de las aves, Hooge (2004a, b) resumió las respuestas (de 16 a 44 pruebas de alimentación) de alimentar pollo de engorde y pavos con oligosacáridos mananos y notificaron que aunque la magnitud de las mejoras en las tasas de crecimiento y conversión alimenticia fue relativamente baja e inconsistente, más de la mitad de los estudios mostraron reducciones significativas de mortalidad. Miguel et al. (2004) notificaron que la magnitud del mejoramiento de añadir oligosacáridos mananos en las dietas de cerdos lactantes fue mayor que las respuestas observadas en los estudios avícolas notificados por Hooge (2004a, b), aunque los resultados fueron inconsistentes. De manera similar, Torrecillas et al. (2014) notificaron que aunque varios estudios mostraron mejoras en supervivencia, resistencia a las enfermedades y desempeño de crecimiento de peces, otros estudios no mostraron cambios al añadir oligosacáridos mananos a las dietas.

Se calcula que la concentración de β-glucanos en los coproductos de proteínas fermentadas de maíz es de entre 8.2 a 8.4% mediante el ensayo Megazyme International de β-glucanos en la levadura (Shurson, 2018). Los betaglucanos se clasifican como prebióticos, pero su estructura molecular varía entre fuentes y afecta sus funciones fisiológicas. Vetvicka et al. (2014) revisaron los estudios que involucran la adición de β-glucanos a las dietas porcinas y notificaron mejoras en el crecimiento y distintos tipos de respuestas inmunitarias. No obstante, Vetvicka y Oliveira (2014) concluyeron que las respuestas inconsistentes en crecimiento y en materia de salud por la suplementación de la dieta porcina con β-glucanos puede deberse a las diferencias en su estructura molecular, peso molecular y pureza. La alimentación de varias especies de peces con β-glucanos de levadura ha demostrado en varios estudios que mejora la resistencia a los patógenos, el desempeño del crecimiento y la supervivencia (Ringo et al., 2012). No obstante, es poco probable que la concentración de β-glucanos en los coproductos de proteínas fermentadas de maíz sea lo suficientemente grande con las tasas de inclusión relativamente bajas utilizadas en las dietas acuícolas como para brindar estos beneficios en la salud.

Los nucleótidos derivados de la levadura han mostrado que mejoran la morfología y función intestinal, respuesta inmunitaria, composición de la microbiota intestinal, función y morfología hepática, así como el desempeño del crecimiento (Sauer et al., 2011). No obstante, dado que la levadura contiene otros metabolitos bioactivos y componentes de la pared celular, es difícil atribuirle las mejoras en crecimiento y respuesta inmunitaria solo a los nucleótidos (Sauer et al., 2011). Los resultados de un resumen de las respuestas de 15 estudios mostraron mejoras consistentes en respuestas inmunitarias, resistencia a los patógenos, desempeño del crecimiento y supervivencia al alimentar peces con diversas fuentes de nucleótidos (Ringo et al., 2012). No obstante, la mayoría de las respuestas de 16 estudios revisados por Sauer et al. (2011) que involucraron la alimentación de cerdos con distintas concentraciones de *Saccharomyces cerevisiae*, cultivos de levaduras y productos de nucleótidos comerciales no mostraron efectos.

Aunque la cantidad estimada de levadura residual en los coproductos de proteínas fermentadas de maíz es interesante y tenga un probable beneficio de valor agregado, más allá del valor nutricional de estos coproductos, no debería ser la principal razón para usarlos en el alimento balanceado, por diversos motivos. En primer lugar, la levadura residual no es viable para funcionar como probiótico. En segundo lugar, la concentración de la levadura residual solo representa alrededor del 25% de la masa total de los coproductos de proteínas fermentadas de maíz, lo que significa que están presentes concentraciones mucho más bajas de los componentes bioactivos individuales de la pared celular de la levadura (oligosacáridos mananos, β-glucanos y nucleótidos). Por último, ha sido decepcionante la efectividad, magnitud y consistencia de las mejoras del crecimiento y la salud al añadir productos concentrados de levadura y sus derivados. Para poner en perspectiva estos puntos, Schweer et al. (2017) resumieron las respuestas al desempeño del crecimiento de más de 2,000 pruebas de investigación en cerdos que evaluaron diferentes aditivos de alimentos no antibióticos como los oligosacáridos, prebióticos y productos de levadura, y notificaron que solo cerca del 30% de las pruebas mostró mejoras del desempeño del crecimiento. Entre las categorías de producto, las más consistentes en mejorar la tasa de crecimiento de los cerdos fueron los microbianos alimentados directamente (39.9% de las pruebas), niveles farmacológicos de zinc y cobre (39.2% de las pruebas) y los ácidos orgánicos (31.2%). De las 98 pruebas que evaluaron a los productos de levadura, solo el 23.5% notificó una mayor tasa de crecimiento, el 12.2% notificó un incremento del consumo de alimento, el 11.2% mostró mejor eficiencia de la ganancia y solo el 1% notificó reducción de mortalidad. Comúnmente se cree que las alternativas a los antibióticos promotores del crecimiento pueden ser más eficaces cuando los animales están bajo un desafío sanitario o un evento estresante. Sin embargo, en este resumen de revisión de literatura científica, solo el 8.6% de las pruebas notificó algún tipo de desafío sanitario y tanto los microbianos alimentados directamente (35%) como los niveles farmacológicos de zinc y cobre (30%) fueron más probables de proporcionar mejoras de crecimiento que el resto de los aditivos evaluados. Estos resultados indican que aunque los productos de levadura pueden proporcionar, bajo ciertas condiciones, algo de beneficios al desempeño del crecimiento y la salud en cerdos destetados (así como en aves y peces), es relativamente baja la probabilidad de conseguir una respuesta positiva consistente, además de que no se han definido bien las condiciones que llevan a dichas respuestas positivas al crecimiento.

# Definiciones de la AAFCO de los coproductos de maíz

La comunicación precisa y efectiva entre vendedores y compradores con respecto a la composición nutricional y el valor alimenticio de los ingredientes de alimentos balanceados es fundamental para evitar sorpresas no deseadas o decepciones. Desafortunadamente, uno de los mayores retos de comunicación en el mercado de los coproductos de maíz (y en la literatura científica publicada) es la falta de concientización y del uso de las definiciones estandarizadas de la American Association of Feed Control Officials (AAFCO) de los distintos coproductos del maíz. Además, el uso de distintas marcas de los diversos coproductos de proteínas fermentadas de maíz que se producen con la misma tecnología genera confusión en el mercado. El **cuadro 1** muestra un resumen de los nombres comunes, marcas (si corresponde), análisis típico y la definición de la AAFCO de distintos tipos de coproductos de maíz. Los compradores deberían usar los nombres comunes y marcas (si corresponde) de este cuadro al comunicarse con los proveedores de los distintos coproductos de maíz, para garantizar que haya una clara comprensión del coproducto a considerar. Se recomienda que también los comercializadores de coproductos de maíz eviten utilizar la jerga de la industria del etanol al hablar con los compradores de ingredientes y nutricionistas de la industria de alimentos balanceados. Por ejemplo, se deben usar términos como “condensados de destilería con solubles” en lugar de “miel” o “jarabe” para ayudar a que el cliente ajuste lo que entiende del tipo y características de los coproductos de maíz con las definiciones y terminología de la AAFCO. Otro error terminológico común que se comete, tiene que ver con la descripción de las diferencias relativas del contenido de aceite entre los tipos de DDGS. Términos como DDGS “integral”, “reducidos en aceite” y “desgrasados” suelen tener por objeto proporcionar un indicio relativo del contenido de grasa cruda de los DDGS, pero desafortunadamente, la mayoría de las veces el término “desgrasado” se usa indebidamente al referirse a los DDGS “reducidos en aceite”. El único coproducto de maíz “desgrasado” en el mercado de hoy se produce mediante la extracción del aceite de maíz con solventes, lo cual resulta en un coproducto de DDGS que contiene menos del 3% de grasa cruda y se comercializa con la marca NovaMeal. Por lo tanto, es importante definir claramente el contenido mínimo de grasa cruda de las fuentes de DDGS en la comunicación entre compradores y vendedores.

Tal vez el término más confuso entre los coproductos del etanol es el uso de “alto en proteína” para hablar de los coproductos de maíz con más del 25% al 30% de PC que se encuentra en los DDGS convencionales. Aunque los HP-DDG (de 36% a 48% de PC) es una categoría claramente distinta a los DDGS, a menudo se confunde con los coproductos de proteínas fermentadas de maíz, los cuales tienen concentraciones de más del 48% de PC. Los procesos utilizados para producir proteínas fermentadas de maíz son sustancialmente diferentes a los utilizados para producir HP-DDG, lo que resulta en perfiles nutricionales diferentes. El principal punto de diferenciación entre las dos categorías de proteínas fermentadas de maíz es que los procesos de Fluid Quip Technologies e ICM, Inc. no utilizan ningún aditivo y se listan en la categoría de proteínas fermentadas de maíz separadas mecánicamente. El proceso de Marquis ProCap™ utiliza un floculante y el de Harvesting Technologies utiliza en su proceso un polímero, lo cual resulta en la clasificación de estos coproductos en la categoría de Proteína Fermentada de Maíz (sin separación mecánica).

De manera similar, las fuentes de proteínas fermentadas de maíz se confunden también con las de concentrado de proteína de maíz las cuales se producen mediante procesos de molienda húmeda muy diferentes, dando como resultado perfiles nutricionales sustancialmente distintos. Desafortunadamente, a menudo los productores, comercializadores e investigadores de los coproductos de maíz no describen con cuidado ni usan la terminología adecuada cuando dan información sobre los diferentes coproductos en publicaciones de investigación, sitios web, presentaciones, folletos técnicos y fichas de especificaciones del producto. Por ende, se les advierte a los nutricionistas que sean conscientes de los perfiles de nutrientes tan distintos entre los varios coproductos de maíz “altos en proteína” que se han producido y evaluado en las pruebas de alimentación animal en los últimos 15 años al usar los datos de diversos estudios de investigación publicados. Uno de los objetivos de este Manual de Coproductos de Maíz del U.S. Grains Council es resumir tales diferencias para ayudar a compradores de ingredientes y nutricionistas animales a entender las diferencias entre este creciente portafolio de coproductos de maíz.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Cuadro 1.** Nombres comunes, marcas, análisis típico y definiciones de la American Association of Feed Control Officials (AAFCO) de los coproductos de maíz | | | | | | |
| **Nombre común** | **Marca** | **Análisis típico**  **(con base en como se alimentó)** | | | **Identificación de la AAFCO** | **Descripción general** |
| **Proteína cruda, %** | **Grasa cruda, %** | **Fibra cruda, %** |
| DDGS | Ninguna - commodity | 25-30 | 6-9 | <14 | 27.6, 27.8 | Los granos secos de destilería con solubles condensados de destilería se obtienen después de eliminar el etanol por destilación a partir de la fermentación de levaduras de un grano al condensar y secar el menos ¾ de los sólidos del destilado ligero resultante, y después de eliminar una parte del aceite. |
| DDGS | Dakota Gold | 24-29 | 4-5 | <14 | 27.6, 27.8 | Los granos secos de destilería con solubles condensados de destilería se obtienen después de eliminar el etanol por destilación a partir de la fermentación de levaduras de un grano al condensar y secar al menos ¾ de los sólidos del destilado ligero resultante y después de eliminar una parte del aceite. |
| DDGS desgrasados | NovaMeal | 26-36 | <3 | <14 | 27.9 | Los DDGS extraídos con solventes resultan en un contenido de grasa cruda menor al 3%. |
| DDGS integrales | Ninguna - commodity | 25-32 | 10-14 | <14 | 27.6, 27.8 | Los granos secos de destilería con solubles condensados de destilería se obtienen después de eliminar el etanol por destilación a partir de la fermentación de levaduras de un grano al condensar y secar el menos ¾ de los sólidos del destilado ligero resultante sin eliminar el aceite. |
| DDGS con salvado | Ninguna - commodity | 23-36 | 3-16 | <14 | 27.6, 27.8, 48.2 | DDGS mezclados con salvado separado por planta antes de la fermentación. Puede ser en forma seca o húmeda (aquí se proporciona el análisis común de la forma seca). |
| DDGS separados mecánicamente | No disponible comercialmente | 24-48 | 3-8 | <14 | 27.6 | El destilado ligero completo residual después de la destilación resulta de la separación mecánica de la fibra y la proteína. Contiene solubles condensados de destilería. Puede ser en forma seca o húmeda (aquí se proporciona el análisis común de la forma seca). |
| DDG | Ninguna - commodity | 24-35 | 4-8 | <14 | 27.5 | Los granos secos de destilería sin solubles condensados de destilería se obtienen después de eliminar el etanol a partir de la fermentación de levaduras de un grano o una mezcla de granos. Puede eliminarse parte del aceite. |
| DDG altos proteína | ANDVantage™ 40Y  y otras fuentes sin marca con que usan FST™ de ICM, Inc. | 36-48 | 4-6 | <12 | 27.5 | Granos secos de destilería con la eliminación de una porción de fibra y aceite para concentrar la proteína, pero que no contienen solubles condensados de destilería. |
| Solubles condensados de destilería (miel/jarabe) | Ninguna - commodity | 5-25 | 3-23 | 0-4 | 27.7 | Los solubles condensados de destilería se obtienen después de eliminar el etanol posterior a la destilación al condensar la fracción de destilado ligero en un semisólido. |
| Solubles condensados de destilería (miel/jarabe) | SOLMAX™ | 19-21 | 2-7 | <1 | 27.7 | Los solubles condensados de destilería se obtienen después de eliminar el etanol posterior a la destilación al condensar la fracción de destilado ligero en un semisólido (aproximadamente de 50 a 75% de sólidos). |
| Levadura seca de destilería | ALTO YEAST  PROPLEX DY | 40-55 | 0-8 | 0-6 | 96.5 | Levadura seca de *Saccharomyces cerevisiae*, no fermentativa, inactiva, eliminada de la masa/pasta ya sea antes o después de la destilación, que debe contener más del 40% de proteína cruda. |
| Levadura hidrolizada | ULTRAMAX™ | 40-45 | 6-10 | 3-5 | 96.12 | Levadura digerible concentrada, sin extraer, parcialmente soluble (lograda mediante hidrólisis enzimática). |
| Salvado con jarabe/miel | Solbran™  ANDVantage™ Bran Plus y otras fuentes sin marca que usan FST™ de ICM, Inc. | 18-28 | 4-9 | 15-20 | 48.2, 27.7 | Salvado separado del grano antes de la fermentación y añadido a los solubles condensados de destilería después de la fermentación previo al secado. Puede ser en forma seca o húmeda (aquí se proporciona el análisis común de la forma seca). |
| Fibra fermentada separada mecánicamente | No disponible comercialmente | <24 | 2-7 | 10-20 | 27.6 | La separación mecánica después de la destilación del destilado ligero completo resulta en la concentración de fibra. No contiene solubles de destilería, a menos que se indique. |
| Proteína fermentada de maíz | Ninguna | >48 | 3-8 | <8 | 27.5 | Porciones de fibra y aceite eliminadas mediante la concentración de granos residuales y proteínas de levadura por métodos comúnmente usados en la industria de la destilación. Contiene levadura residual concentrada. No contiene solubles condensados de destilería, a menos que se indique |
| Proteína fermenta de maíz separada mecánicamente | A+ Pro  BP 50  NexPro®  AltiPro™  Still Pro 50™1  ANDVantage™ 50Y  PROTOMAX™  ProCap Gold™ | >48 | 1-5 | <8 | 27.5 | Separación de la proteína después de la destilación del destilado ligero entero por separación mecánica. Contiene productos de levadura residual; después de la destilación no se utilizan métodos eléctricos. No contiene solubles de destilería, a menos que se indique. |

1Ya no se comercializa Still Pro 50™ con este nombre, pero aquí se lista porque se usa en la literatura científica publicada para describir la proteína fermentada de maíz producida con Fluid Quip Technologies.

El aceite de destilería de maíz (CDO) es otro coproducto importante disponible para su uso como fuente de energía suplementaria en alimento para animales; no se lista en el cuadro 1 porque no contiene proteína o ni fibra cruda. El proceso involucra la eliminación parcial de aceite de maíz por centrifugación del flujo de solubles condensados de destilería o mediante la extracción con solventes de los DDGS. El aceite de destilería de maíz contiene más del 85% de ácidos grasos totales, menos del 2.5% de materia insaponificable, menos del 1% de impurezas insolubles; en el capítulo 8 de este manual se describe su perfil de ácidos grasos, contenido de energía metabolizable y aplicaciones en alimentación de cerdos y aves.

# Perfil de nutrientes de los coproductos de proteína fermentada de maíz

Se utilizan por lo menos tres tipos diferentes de tecnologías patentadas de procesamiento para la producción de los coproductos de proteínas fermentadas de maíz. La Advanced Processing Package™ (APP™) de ICM se usa para producir PROTOMAX™, también vendido por The Andersons, Inc. como ANDVantage 50Y. La Maximized Stillage Co-Products Technology™ (MSC™) de Fluid Quip Technologies se usa para producir coproductos de proteínas fermentadas de maíz con las marcas BP50, A+ Pro, NexPro® y Altipro. La Marquis ProCap™ Technology™ se usa para producir un coproducto de proteínas fermentadas de maíz comercializado bajo la marca de ProCap Gold™. Aunque cada uno de estos tipos de tecnologías concentran la proteína y levadura en los coproductos finales, sus perfiles nutricionales son distintos (**cuadro 2**). Además, se comercializan otras tecnologías nuevas que producirán nuevos coproductos de maíz que en el futuro cercano entrarán al mercado de ingredientes de alimentos balanceados.

Con base en materia seca (MS), el contenido de energía bruta de las fuentes de proteínas fermentadas de maíz varía de 5,309 kcal/kg a 5,795 kcal/kg de MS, pero es sustancialmente mayor que los 4,940 kcal/kg a 5,140 kcal/kg de MS que se encuentran en las fuentes de DDGS convencionales (Yang et al., 2021). Algunos estudios han determinado y comparado el contenido de EM de las fuentes de proteína fermentada de maíz con DDGS en cerdos (capítulo 6) y pollo de engorde (capítulo 5); el contenido de EM de los coproductos de proteínas fermentadas de maíz es de 1.2 a 1.5 veces mayor que en los DDGS. El contenido de PC de los coproductos de proteínas fermentadas de maíz también varía, pero por lo general es mayor a 53% (base a MS). De igual forma, dicho rango amplio de contenido de PC resultó en concentraciones variables de muchos aminoácidos esenciales entre las fuentes de coproductos de proteínas fermentadas de maíz (**cuadro 3**), en especial de Lys (1.91% a 2.26%), Met (0.93% a 1.37%), Thr (1.86% a 2.15%) y Trp (0.39% a 0.62%).

Aunque en varios estudios publicados sobre distintos coproductos de proteínas fermentadas de maíz se han notificado diferentes mediciones de contenido de lípidos (extracto etéreo y extracto etéreo hidrolizado con ácido) y de fibra [fibra neutrodetergente (FND), fibra ácido detergente (FAD), fibra dietética soluble, fibra dietética insoluble y fibra total dietética (FTD)], las concentraciones de los componentes nutricionales también varían entre las fuentes (**cuadro 3**). Si bien el contenido de cenizas de las fuentes de proteínas fermentadas de maíz varía de 1.54% a 8.49%, las concentraciones de calcio y fósforo son relativamente similares entre las fuentes. Por lo tanto, para optimizar la eficiencia energética y nutricional al incluir cualquiera de estos coproductos de proteínas fermentadas de maíz en dietas porcinas y avícolas, es fundamental el uso de valores adecuados de EM, aminoácidos digestibles y fósforo digestible durante la formulación de alimentos; los capítulos 5 y 6 de este manual resumen la información actualmente disponible.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Cuadro 2.** Comparación de la composición nutricional de varias fuentes de proteína fermentada de maíz (con base materia seca) | | | | | |
| **Componente** | **ANDVantage 50Y1** | **Still Pro 502** | **A+ Pro3** | **NexPro4** | **ProCap Gold5** |
| Materia seca, % | 93.76 | 100 | 91.73 | 93 | 88 |
| Energía bruta, kcal/kg | 5,636 | NN | 5,351 | 5,309 | 5,795 |
| Proteína cruda, % | 55.24 | 53 | 54.73 | 53.87 | 55.78 |
| Lisina:proteína cruda | 3.46 | 4.19 | 3.96 | 3.95 | 3.93 |
| Extracto etéreo, % | NN\* | 5.1 | 5 | NN | NN |
| Extracto etéreo hidrolizado con ácido, % | 10.56 | NN | NN | 6.02 | 10.78 |
| Fibra neutrodetergente, % | 30.566 | 24.1 | 26.52 | NN | NN |
| Fibra ácidodetergente, % | 22.226 | 4.83 | 5.27 | NN | NN |
| Fibra dietética soluble, % | 2.99 | NN | NN | 3.66 | 1.16 |
| Fibra dietética insoluble, % | 29.2 | NN | NN | 26.23 | 24.74 |
| Fibra dietética total, % | 31.14 | NN | NN | 29.89 | 25.90 |
| Cenizas, % | 1.54 | 5.49 | 5.98 | 8.49 | 8.39 |
| Ca, % | 0.026 | 0.05 | 0.04 | NN | 0.05 |
| P, % | 0.706 | 1.1 | 0.89 | NN | 0.88 |

\*NN = No se notificó.

1Datos inéditos de Lee y Stein (2021) obtenidos con autorización de The Andersons, Inc.

2Datos publicados obtenidos de Correy et al. (2019); ya no se comercializa Still Pro 50™ con este nombre, pero aquí se lista porque se usó en este estudio para describir la proteína fermentada de maíz producida con Fluid Quip Technologies.

3Datos publicados obtenidos de Yang et al. (2021).

4Datos publicados obtenidos de Acosta et al. (2021).

5Datos publicados obtenidos de Cristóbal et al. (2020).

6Datos inéditos obtenidos con autorización de The Andersons, Inc.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Cuadro 3.** Comparación de perfiles de aminoácidos de las fuentes de proteína fermentada de maíz (base materia seca) | | | | | |
| **Componente** | **ANDVantage 50Y1** | **Still Pro 502** | **A+ Pro3** | **NexPro4** | **ProCap Gold5** |
| Materia seca, % | 93.76 | 100 | 91.73 | 93 | 88 |
| Proteína cruda, % | 55.24 | 53 | 54.73 | 53.87 | 55.78 |
| Aminoácidos esenciales, % | | | | | |
| Arg | 2.53 | 2.49 | 2.57 | 2.48 | 2.81 |
| His | 1.22 | 1.41 | 1.57 | 1.43 | 1.59 |
| Ile | 2.14 | 2.24 | 2.46 | 2.35 | 2.31 |
| Leu | 6.87 | 5.80 | 6.87 | 6.11 | 6.33 |
| Lys | 1.91 | 2.22 | 2.17 | 2.13 | 2.15 |
| Met | 1.37 | 1.05 | 1.17 | 1.09 | 1.24 |
| Phe | 2.93 | 2.67 | 2.90 | 2.68 | 2.85 |
| Thr | 2.13 | 2.06 | 2.19 | 2.15 | 2.15 |
| Trp | 0.62 | 0.45 | 0.40 | 0.45 | 0.56 |
| Val | 2.71 | 3.08 | 3.21 | 3.04 | 3.23 |
| Aminoácidos no esenciales, % | | | | | |
| Ala | 4.07 | 3.51 | 4.09 | 3.73 | 3.88 |
| Asp | 3.72 | 3.62 | 3.89 | 3.81 | 3.84 |
| Cys | 1.19 | 0.90 | 1.07 | 0.94 | 1.14 |
| Glu | 9.46 | 7.61 | 8.88 | 7.94 | 8.55 |
| Gly | 2.09 | 2 | 2.18 | 2.16 | 2.34 |
| Pro | 4.45 | 3.46 | NN | 3.76 | 4 |
| Ser | 2.55 | 2.25 | 2.47 | 2.33 | 2.50 |
| Tyr | 2.47 | 2.08 | 2.22 | 2.13 | 2.16 |

\*NN = No se notificó.

1Datos inéditos de Lee y Stein (2021) obtenidos con autorización de The Andersons, Inc.

2Datos publicados de Correy et al. (2019); ya no se comercializa Still Pro 50™ con este nombre, pero aquí se lista porque se usó en este estudio para describir la proteína fermentada de maíz producida con Fluid Quip Technologies.

3Datos publicados de Yang et al. (2021).

4Datos publicados de Acosta et al. (2021).

5Datos publicados de Cristóbal et al. (2020).

# Impactos ambientales de los coproductos de proteína fermentada de maíz

El futuro del planeta y de la sociedad humana depende de nuestra capacidad de crear una economía circular regenerativa que disminuya el desperdicio, la huella de carbono y nitrógeno, así como el cambio climático, pero al mismo tiempo mejorando la eficiencia en el uso de recursos para mantener su consumo dentro de los límites del planeta con una población mundial en constante aumento. Uno de los temas ampliamente debatidos que involucra la seguridad alimentaria y la sustentabilidad es si la producción de animales para consumo humano deba de seguir formando parte de nuestro sistema alimentario mundial.

La industria pecuaria es primordial para nuestro sistema alimentario, económico y social en el mundo, pues representa el 40% de producto interno bruto agropecuario, da empleo a 1,300 millones de personas, genera medios de subsistencia para 1,000 millones de personas, proporciona el 33% del consumo de proteína en la dieta y es una posible solución para superar la desnutrición (Steinfeld et al., 2006). Sin embargo, es también un importante contribuyente de muchos de los problemas ambientales, tales como degradación de la tierra, cambio climático, contaminación del aire, escasez de agua y contaminación, además de pérdida de la biodiversidad (Steinfeld et al., 2006).

Se ha notificado que el estimado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la producción ganadera en el mundo oscila entre el 8 y el 51%, lo cual genera confusión entre científicos y legisladores (Herrero et al., 2011). Aunque este cálculo ha sido muy discutido, el cálculo actual es de 14.5% (Gerber et al., 2013). Dependiendo de la especie animal, el tipo de sistema de producción y la ubicación geográfica; la producción del alimento balanceado contribuye del 50 al 85% del impacto en el cambio climático, del 64 al 97% del potencial de eutrofización, de 70 al 96% de uso energético y casi 100% de la ocupación de tierras en los sistemas de producción de animales monogástricos (García-Launay et al., 2018). Por lo tanto, como los ingredientes que se usan en la producción de alimento para animales influyen mucho en el impacto ambiental, una de las estrategias más eficaces para disminuir tal impacto de la producción animal es el uso de enfoques multiobjetivo de formulación de dietas como ingredientes con un impacto ambiental bajo determinado por la LCA (Mackenzie et al., 2016b; García-Launay et al., 2018; de Quelen et al., 2021; Méda et al., 2021; Soleimani y Gilbert, 2021). La evaluación del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) es una recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales de un sistema utilizado para la producción de un producto durante todo su ciclo de vida (van Middelaar et al., 2019). Se establecieron metodologías y lineamientos estandarizados para determinar diversos indicadores de impacto ambiental LCA (LEAP, 2015), pero la mayoría del número limitado de bases de datos de ingredientes de LCA incluyen ingredientes utilizados en la Unión Europea, mientras que los valores LCA no son directamente aplicables a los que se utilizan en EE. UU. No obstante, el Global Feed LCA institute (GFLI; <https://tools.blonkconsultants.nl/tool/16/>) ha desarrollado la mayor base de datos (962 ingredientes) con la mayoría de las variables de indicadores de LCA (n = 18; **cuadro 4**) y la aplicación mundial más amplia (Unión Europea, Estados Unidos y Canadá).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Cuadro 4.** Medidas de impacto ambiental del Global Feed LCA Institute que se han aplicado a los ingredientes de alimentos balanceados | | |
| **Medición del impacto ambiental** | **Unidad** | **Descripción** |
| Calentamiento global con o sin cambio del uso de la tierra | equiv. de kg CO2/kg de producto | Indicador de posible calentamiento global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero al aire, utilizando dióxido de carbono como norma, con o sin cambio del uso de la tierra |
| Agotamiento del ozono estratosférico | equiv. de kg CFC11/kg de producto | Indicador de emisiones al aire que ocasionan la destrucción de la capa estratosférica de ozono utilizando clorofluorocarbono-11 como estándar de referencia |
| Radiación ionizante | equiv. de kBq Co-60/kg de producto | Impacto en la radiación medido por kilobequerelios del isótopo radioactivo cobalto-60 como estándar de referencia |
| Formación de ozono, salud humana | equiv. de kg NOx/kg de producto | Impacto en los gases de óxido nitroso que afectan al ozono y la salud humana |
| Formación de materia de partículas finas | equiv. de kg PM2.5/kg de producto | Impacto sobre la calidad del aire como material particulado atmosférico, con partículas de un diámetro de menor a 2.5 micrómetros |
| Formación de ozono, ecosistemas terrestres | equiv. de kg NOx/kg de producto | Impacto en los gases de óxido nitroso que afectan al ozono y la salud humana |
| Acidificación de la tierra | equiv. de kg SO2/kg de producto | Indicador del potencial de acidificación de la tierra y el agua debido a la liberación de gases de óxido de nitrógeno y óxido de azufre |
| Eutrofización de agua dulce | equiv. de kg de P/kg de producto | Indicador del potencial de mayores emisiones de fósforo en el agua dulce |
| Eutrofización marina | equiv. de kg de N/kg de producto | Indicador del potencial de mayores emisiones de nitrógeno en el agua dulce |
| Ecotoxicidad terrestre | kg 1,4-DCB/kg de producto | Impacto de sustancias tóxicas emitidas al ambiente en organismos terrestres utilizando 1,4-diclorobenceno como estándar |
| Ecotoxicidad de agua dulce | kg 1,4-DCB/kg de producto | Impacto de sustancias tóxicas emitidas al ambiente en organismos de agua dulce utilizando 1,4-diclorobenceno como estándar |
| Ecotoxicidad marina | kg 1,4-DCB/kg de producto | Impacto de sustancias tóxicas emitidas al ambiente en organismos marinos utilizando 1,4-diclorobenceno como estándar |
| Toxicidad cancerígena en humanos | kg 1,4-DCB/kg de producto | Impacto de sustancias tóxicas cancerígenas en el ambiente utilizando 1,4-diclorobenceno como estándar |
| Toxicidad no cancerígena en humanos | kg 1,4-DCB/kg de producto | Impacto de sustancias tóxicas no cancerígenas en el ambiente utilizando 1,4-diclorobenceno como estándar |
| Uso de la tierra | equiv. de m2 de cultivo/kg de producto | Impacto de convertir tierras no agrícolas para uso agrícola |
| Escasez de recursos minerales | equiv. de kg de Cu/kg de producto | Indicador del agotamiento de los recursos minerales inorgánicos naturales utilizando cobre como estándar |
| Escasez de recursos fósiles | equiv. de kg de aceite/kg de producto | Indicador del agotamiento de recursos de combustibles fósiles naturales |
| Consumo de agua | m3/kg de producto | Indicador de la cantidad de agua (en m3) necesaria para producir un kg de producto |

Además de la emisión de GEI y de la huella de carbono, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura inició recientemente un nuevo enfoque para mejorar la utilización de nitrógeno (N) y reducir su desperdicio en 50% hacia 2030. La industria pecuaria mundial contribuye con casi un tercio de las emisiones de N inducidas por humanos (nitratos, amoniaco, óxido nitroso y otros óxidos de nitrógeno); las cadenas de suministro avícolas y porcinas contribuyen con el 29% del total de los animales de producción para consumo humano y el 68% de estas emisiones están relacionadas con la producción del alimento balanceado (Uwizeye et al., 2020). El óxido nitroso es un potente gas de efecto invernadero; el amoniaco y los óxidos de nitrógeno contribuyen con la contaminación del aire, causan acidificación y eutrofización, y representan riesgos para la salud humana (Galloway et al., 2008; Sutton et al., 2013). Los nitratos y N orgánico han ocasionado un aumento de la contaminación del agua y pérdida de la biodiversidad (Galloway et al., 2003; Hamilton et al., 2018; Ascott et al., 2017; Erisman et al., 2013). En todo el mundo, solo se retiene el 20% del N en productos útiles, el 80% de varias formas se pierde en el ambiente (Sutton et al., 2019). Por lo tanto, hay una gran necesidad de mejorar el uso de proteínas, aminoácidos y nitrógeno en las dietas de los animales de producción, en especial en aquellas que puedan brindar una cantidad sustancial de aminoácidos como la proteínas fermentadas de maíz, a fin de cubrir los requerimientos diarios de peces, aves y cerdos.

El fósforo (P) es el tercer componente nutricional más caro en las dietas animales, detrás de la energía y los aminoácidos. Oster et al. (2018) identificaron varios vacíos que se deben abordar para equilibrar el ciclo agrícola del P y mejorar la sustentabilidad de la producción porcina y avícola; para ello, indicaron mejorar las estrategias de alimentación animal (añadir fitasa a las dietas), reutilizar y reciclar (heces y desperdicios de plantas de procesamiento), enfocarse en los agroecosistemas del suelo, mejorar el desempeño económico del productor, y desarrollar políticas y reglamentaciones gubernamentales eficaces (cuota de P, impuesto de P). Un aspecto importante que falta en estas estrategias es el uso de los coproductos de maíz como la proteínas fermentadas de maíz y los DDGS, los cuales tienen concentraciones relativamente altas de P digestible, que pueden reducir la dependencia de suplementos de P inorgánico y la excreción de este mineral en las heces. Si no se incluyen coproductos de maíz en las dietas porcinas, avícolas y acuícolas, la única otra opción que queda para optimizar el uso del P al dar dietas con ingredientes vegetales con cantidades relativamente altas de fitato a cerdos, es añadir enzimas fitasas exógenas. Con fitasa, aumenta la proporción de P en la dieta que el animal usa, se reduce la cantidad de excreción de P en las heces y se minimizan los efectos antinutricionales del fitato en la digestibilidad de los otros nutrientes (Shurson et al., 2021). De hecho, varias plantas de etanol añaden fitasa durante el proceso de fermentación, la cual incrementa más la conversión de fitato indigestible a fosfato digestible (Reis et al., 2018). Todos estos beneficios se proporcionan con el uso de proteínas fermentadas de maíz y otros coproductos, porque la cantidad de fitato en el maíz se convierte naturalmente en fosfato digestible por la levadura durante el proceso de fermentación. Por lo tanto, si se usan los coproductos de maíz y la fitasa de forma estratégica en las dietas de monogástricos es posible lograr el objetivo de nutrición “sin fitato” propuesto por Cowlieson et al. (2016).

La producción de maíz utiliza grandes cantidades de agua, tierra y otros insumos que contribuyen a las emisiones de GEI, al cambio climático, agotamiento de combustibles fósiles, contaminación del aire y escasez local de agua (Smith et al., 2017). Las industrias estadounidenses del etanol y pecuaria son los principales consumidores de maíz y se centran cada vez más en evaluar y mejorar la sustentabilidad ambiental. Aunque algunos estudios (Kraatz et al., 2013) han indicado que la transformación del destilado ligero completo en electricidad, calor y fertilizantes tiene 54% menos intensidad energética y 67% menor potencial de calentamiento global que procesarlos en DDGS, Smith et al. (2017) desarrollaron un modelo para tomar en cuenta los impactos ambientales nacionales a nivel de país de usar el maíz estadounidense en las cadenas de suministro de la producción pecuaria y etanol, que ha demostrado que estos efectos varían por ubicación, sector de la industria e indicadores ambientales evaluados. Varios estudios han evaluado diversos impactos ambientales de alimentar granos de maíz de destilería con solubles al ganado de engorde (Hϋnerberg et al., 2014; Leinonen et al., 2018; Asem-Hiablie et al., 2019; Werth et al., 2021), ganado lechero (Aguirre-Villegas et al., 2015), aves (Kebreab et al., 2016; Benavides et al., 2020), cerdos (Stone et al., 2012; Meul et al., 2012; Kebreab et al., 2016; Mackenzie et al., 2016a,b; Benavides et al., 2020) y en acuicultura (Henriksson et al., 2017; Cortés et al., 2021). Dependiendo de los límites del sistema a modelar, el método de asignación y la proporción de los impactos ambientales asignados al etanol y DDGS, hay beneficios ambientales positivos y negativos con la alimentación de los DDGS a varias especies animales. No obstante, esto no es diferente que lo que sucede con la mayoría de los otros ingredientes de alimentos.

Debido a la enorme necesidad de reducir la huella de carbono de la producción de los biocombustibles y sus coproductos, Marquis Energy fue una de las primeras instalaciones de producción de etanol y coproductos de EE. UU. en certificarse bajo el protocolo International Sustainability and Carbon Certification (ISCC, por sus siglas en inglés) en 2010. La ISCC se creó para cumplir con la directiva de la Unión Europea de reducir las emisiones de GEI mediante el uso de energías renovables, por lo que es necesaria una calificación baja de intensidad del carbono (IC) para comercializar biocombustibles en la Unión Europea. En Japón, se requiere de la ISCC Plus para comercializar biocombustibles. Aunque la ISCC se diseñó para asignar una calificación de IC en los biocombustibles, el programa también la asigna a los coproductos de maíz producidos, como los DDGS y proteínas fermentadas de maíz (ProCap Gold™). A diferencia de la mayoría de las determinaciones LCA, todos los insumos de IC en el protocolo de la ISCC se distribuyen a cada flujo de producto (incluidos los coproductos de maíz), con base en el contenido de energía derivado de cada uno de dichos flujos. Esto resulta en calificaciones de IC iguales para etanol y los coproductos a las puertas de la planta de etanol. La intensidad de carbono actual de los DDGS en la industria estadounidense del etanol es casi de 700 g de equivalente de CO2/kg de DDGS. De las fuentes de coproductos en la industria, los DDGS y las proteínas fermentadas de maíz (ProCap Gold™) producidos por Marquis Energy tienen una calificación de IC (<https://www.iscc-system.org/certificates/valid-certificates/>) de apenas el 25% (175 g de equivalente de CO2/kg de DDGS y ProCap Gold™). Esta espectacular reducción en la intensidad del carbono se consiguió con la inversión e implementación estratégica de tecnologías y prácticas que incluyen la captura y recuperación del carbono. Las mediciones de IC de la ISCC usan LCA en varios pasos de toda la cadena de suministros del etanol y coproductos, que comienza en la granja y termina en el usuario final. Marquis Energy trabaja muy de cerca con los proveedores de los productores de maíz para garantizar, mediante auditorías de terceros, que se implementen y sigan las prácticas de bajo carbono (por ejemplo, no convertir bosques madereros o praderas vírgenes en tierras de cultivo, control de la erosión, manejo responsable de los nutrientes, mantener un hábitat natural). Para la producción de etanol y los coproductos certificados como ISCC solo se puede utilizar el maíz producido por agricultores que participen voluntariamente en este programa.

Los coproductos de proteínas fermentadas de maíz son relativamente nuevos en el mercado de ingredientes para alimentos balanceados; se producen y usan cantidades mucho más pequeñas, en comparación con los DDGS. Por ende, hay poca información sobre la alimentación de estos coproductos en distintas especies animales y su impacto ambiental. Sin embargo, un estudio reciente realizado por Burton et al. (2021) calculó los efectos de alimentar con dietas que contenían cantidades crecientes de proteínas fermentadas de maíz en las emisiones de GEI por kg de ganancia de peso corporal y kg de carne producida en pollos de engorde (**cuadro 6**), por kg de ganancia de peso corporal en pavitos y por kg de alimento y ganancia de peso corporal en salmón del Atlántico (**cuadro 7**) utilizando una asignación económica. Los resultados de las pruebas de alimentación utilizados en este estudio se encuentran y analizan en el capítulo 2 (acuicultura) y el capítulo 3 (aves). Se utilizó la base de datos del Global Food LCA Institute (GFLI) para obtener la información de los ingredientes de las dietas experimentales para calcular las emisiones de GEI. No obstante, ya que la base de datos del GFLI no contiene datos LCA de las proteínas fermentadas de maíz, los investigadores usaron en los cálculos los datos de impacto ambiental de Tallentire et al. (2018) de un coproducto de maíz alto en proteína distinto producido en la industria del etanol. Esta suposición es cuestionable porque se usaron distintos insumos y procesos para la producción de fuentes diferentes de proteínas fermentadas de maíz. Además, la proteínas fermentadas de maíz sustituyeron parcialmente parte de la harina de soya en las dietas utilizadas en estas pruebas de alimentación, pero los datos LCA de la harina de soya son altamente variables en función del país de origen y pueden tener un efecto importante en los resultados. Desafortunadamente, no se describen estos detalles en este estudio. Aunque estos problemas contribuyen a resultados cuestionables, parece que las cantidades crecientes de proteínas fermentadas de maíz en las dietas de pollo de engorde redujeron las emisiones de GEI por kg de ganancia de peso y por kg de carne producida (**cuadro 5**). Además, aunque la adición de 10% de proteínas fermentadas de maíz a las dietas del pollo de engorde resultó en una retención similar de N en comparación con la dieta control con 0% de este coproducto, sí mejoró con la alimentación de dietas con 5%. Las formulaciones de alimentos que mejoran la retención de N pueden también reducir su excreción, lo cual podría ser otro efecto ambiental benéfico. De forma similar, la alimentación de dietas que contienen 0%, 4% y 8% de proteínas fermentadas de maíz a pavitos redujo las emisiones de GEI (equivalente de kg de CO2 por kg de ganancia de peso corporal) de 3.96 (0%) a 3.77 y 3.40 kg equivalente de CO2, respectivamente. De la misma manera, la adición de cantidades crecientes de proteínas fermentadas de maíz para sustituir parcialmente la harina de soya en las dietas de salmón del Atlántico parece reducir las emisiones de GEI por kg de alimento y por kg de ganancia de peso (**cuadro 6**). Por lo tanto, es probable que el uso de proteínas fermentadas de maíz para sustituir a la harina de soya en las dietas de salmón tenga una ventaja importante para reducir la huella de carbono en su producción, en especial bajo las condiciones europeas donde se desaconseja la importación de harina de soya de las zonas deforestadas de Sudamérica.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Cuadro 5.** Efectos de alimentar niveles crecientes de proteínas fermentadas de maíz en la dieta de pollos de engorde sobre la retención de nitrógeno y las emisiones de gases de efecto invernadero estimadas durante un período de alimentación de 42 días (adaptado de Burton et al., 2021) | | | |
| **Medición** | **Tasa de inclusión de proteína fermentada de maíz en la dieta, %** | | |
| **0%** | **5%** | **10%** |
| Retención de nitrógeno, % | 29.4b | 30.4a | 28.7b |
| Emisiones de gases de efecto invernadero, equivalente de kg CO2/kg de ganancia de peso corporal | 2.48 | 2.21 | 2.01 |
| Emisiones de gases de efecto invernadero, equivalente de kg CO2/kg de carne | 5.85 | 5.03 | 4.57 |

a,b Las medias dentro del mismo renglón con diferentes superíndices son diferentes (P < 0.05).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Cuadro 6.** Efectos de alimentar dietas con 0, 5, 10, 15 y 20% de proteína fermentada de maíz como sustituto parcial de la harina de soya en salmón del Atlántico (peso inicial = 304 g) en las emisiones de gases de efecto invernadero estimadas durante un período de alimentación de 12 semanas (adaptado de Burton et al., 2021) | | | | | |
| **Medición** | **Tasa de inclusión de proteína fermentada de maíz en la dieta, %** | | | | |
| **0%** | **5%** | **10%** | **15%** | **20%** |
| Emisiones de gases de efecto invernadero, equivalente de kg CO2/kg de alimento1 | 1.64 | 1.55 | 1.47 | 1.39 | 1.30 |
| Emisiones de gases de efecto invernadero, equivalente de kg CO2/kg ganancia | 1.59 | 1.44 | 1.37 | 1.36 | 1.27 |

a,b Las medias dentro del mismo renglón con diferentes superíndices son diferentes (P < 0.05).

# Conclusiones

Los coproductos de proteína fermentada de maíz (CFP) se producen mediante nuevas tecnologías en las plantas de etanol de molienda en seco, los cuales contienen altas concentraciones de energía, proteína cruda y aminoácidos que tienen aplicaciones principalmente en la alimentación de dietas acuícolas, de pollo de engorde y cerdos destetados, pero se pueden usar en todos los alimentos para animales. Los perfiles de nutrientes y la digestibilidad de aminoácidos varían entre las fuentes de estas proteínas, por lo que es necesaria una buena comunicación con los proveedores para aplicar los coeficientes adecuados de energía metabolizable y digestibilidad de aminoácidos a la fuente específica de proteínas fermentadas de maíz que se use en la formulación del alimento. El perfil de aminoácidos de la proteína del maíz es relativamente bajo en lisina y triptófano, pero alto en leucina, lo cual genera un desequilibrio de aminoácidos con valina e isoleucina que requiere de la suplementación de aminoácidos sintéticos a medida que aumentan las tasas de inclusión de estas proteínas en las dietas de monogástricos para conseguir respuestas satisfactorias al desempeño del crecimiento y composición de la canal. Estos coproductos también tienen un estimado de 20 a 29% de levadura residual, lo cual contribuye a un perfil de aminoácidos ligeramente mejor con respecto al requerimiento de aminoácidos y puede proporcionar beneficios a la salud animal, dependiendo de la tasa de inclusión en la dieta y el estatus de salud de peces, cerdos y aves.

El uso de ingredientes de alimentos balanceados con bajo impacto ambiental es parte fundamental de la producción sustentable de animales para consumo humano. Aunque hay varias evaluaciones de ciclo de vida con la adición de DDGS en el alimento para animales que han demostrado un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), hay otros impactos ambientales que se reducen considerablemente. Algunas plantas de etanol de EE UU se han certificado bajo el protocolo International Sustainability and Carbon Certification para cumplir la directiva de la Unión Europea de reducir las emisiones de GEI mediante el uso de energías renovables y calificaciones bajas de intensidad de carbono del etanol y los coproductos de maíz. Se llevó a cabo un estudio inicial para calcular los efectos de alimentar dietas que contenían proteínas fermentadas de maíz en pollo de engorde, pavos y salmón del Atlántico en las emisiones de GEI que demostraron reducciones sustanciales.

# Bibliografía

AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials – Official Publication. Champaign, IL.

Acosta, J.P., C.D. Espinosa, N.W. Jaworski, and H.H. Stein. 2021. Corn protein has greater concentrations of digestible amino acids and energy than low-oil corn distillers dried grains with solubles when fed to pigs but does not affect the growth performance of weanling pigs. J. Anim. Sci. 99:1-12. Doi:10.1093/jas/skab175

Aguirre-Villegas, H.A., T.H., Passos-Fonseca, D.J. Reinemann, L.E. Armentano, M.A. Wattiaux, V.E. Cabrera, J.M. Norman, and R. Larson. 2015. Green cheese: Partial life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy intensity of integrated dairy production and bioenergy systems. J. Dairy Sci. 98:1571-1592. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8850>

Ascott, M.J., D.C. Gooddy, L. Wang, M.E. Stuart, M.A. Lewis, R.S. Ward, and A.M. Binley. 2017. Global patterns of nitrate storage in the vadose zone. Nat. Commun. 8:1416.

Asem-Hiablie, S., T. Battagliese, K.R. Stackhouse-Lawson, and C.A. Rotz. 2019. A life cycle assessment of the environmental impacts of a beef system in the USA. The Intl. J. Life Cycle Assess. 24:441-455. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1464-6>

Benavides, P.T., H. Cai, M. Wang, and N. Bajjalieh. 2020. Life-cycle analysis of soybean meal, distiller-dried grains with solubles, and synthetic amino acid-based animal feeds for swine and poultry production. Anim. Feed Sci. Technol. 268:114607. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114607>

Burton, E., D. Scholey, A. Alkhtib, and P. Williams. 2021. Use of an ethanol bio-refinery product as a soybean alternative in diets for fast-growing meat production species: A circular economy approach. Sustainability 13:11019. <https://doi.org/10.3390/su131911019>

Cemin, H.S., M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019a. Meta-regression analysis to predict the influence of branched-chain and large neutral amino acids on growth performance of pigs. J. Anim. Sci. 2019.97:2505-2514. Doi:10.1093/jas/skz118

Cemin, H.S., M.D. Tokach, J.C. Woodworth, S.S. Dritz, J.M DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019b. Branched-chain amino acid interactions in growing pig diets. Trans. Anim. Sci. 2019.3:1246-1253. doi:10.1093/tas/txz087

Clizer, D.A. 2021. Evaluating impacts of tryptophan and branched chain amino acids in swine diets containing corn based dried distillers grains on the growth performance and carcass characteristics of grow-finish pigs. Ph.D. Thesis, South Dakota State University, Brookings. 191 pp.

Corray, S., P. Utterback, D. Ramchandran, V. Singh, S.P. Moose, and C.M. Parsons. 2019. Nutritional evaluation of 3 types of novel ethanol coproducts. Poult. Sci. 98:2933-2939. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez043>

Cortés, A., R. Casillas-Hernández, C. Cambeses-Franco, R. Bórquez-López, F. Magallón-Barajas, W. Quadros-Seiffert, G. Feijoo, M.T. Moreira. 2021. Eco-efficiency assessment of shrimp aquaculture production in Mexico. Aquaculture 544:737145. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737145>

Cowieson, A.J., J.P. Ruckebusch, I Knap, P. Guggenbuhl, and F. Fru-Nji. 2016. Phytate-free nutrition: A new paradigm in monogastric animal production. Anim. Feed Sci. technol. 222:180-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.10.016>

Cristobal, M., J.P. Acosta, S.A. Lee, and H.H. Stein. 2020. A new source of high-protein distillers dried grains with solubles (DDGS) has greater digestibility of amino acids and energy, but less digestibility of phosphorus, than de-oiled DDGS when fed to growing pigs. J. Anim. Sci. 98:1-9. doi:10.1093/jas/skaa200

de Quelen, F., L. Brossard, A. Wilfart, J.-Y. Dourmad, and F. Garcia-Launay. 2021. Eco-friendly feed formulation and on-farm feed production as ways to reduce the environmental impacts of pig production without consequences on animal performance. Front. Vet Sci. 8:689012. doi: 10.3389/fvets.2021.689012

Erisman, J.W., J.N. Galloway, S. Seitzinger, A. Bleeker, N.B. Dise, A.M.R. Petrescu, A.M. Leach, and W. de vries. 2013. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. Phil. Trans. R. Soc. B 368:20130166.

Erwan, E., A.R. Alimon, A.Q. Sazili, and H. Yaakub. 2008. Effect of varying levels of leucine and energy on performance and carcass characteristics of broiler chickens. International J. Poult. Sci. 7:696-699.

Galloway, J.N., A.R. Townsend, J.W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J.R. Freney, L.A. Martinelli, S.P. Seitzinger, and M.A. Sutton. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions and potential solutions. Science 320:889-892.

Galloway, J.N., J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling, and B.J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. BioScience 53:341-356.

Garcia-Launay, F., L. Dusart, S. Espagnol, S. Laisse-Redoux, D. Gaudré, B. Méda, and A. Wilfart. 2018. Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. Br. J. Nutr. 120:1298-1309. doi:10.1017/S0007114518002672

Gerber, P.J., H. Steinfeld, B. Henderson, A. Mottet, C. Opio, J. Dijkman, A. Falcucci, and G. Tempio. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. 139 pp. <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>

Hamilton, H.A., D. Ivanova, K. Stadler, S. Merciai, J. Schmidt, R. van Zelm, D. Moran, and R. Wood. 2018. Trade and the role of non-food commodities for global eutrophication. Nat. Sustain. 1:314-321.

Henriksson, P.J.G., C.V. Mohan, and M.J. Phillips. 2017. Evaluation of different aquaculture feed ingredients in Indonesia using life cycle assessment. IJoLCAS 1:13-21.

Herrero, M., and P.K. Thornton. 2013. Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems. PNAS 110(52):20878-20881. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1321844111](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1321844111)

Hooge, D.M. 2004a. Meta-analysis of broiler chicken pen trials evaluating dietary mannan oligosaccharide, 1993-2003. Int. J. Poult. Sci. 3:163-174.

Hooge, D.M. 2004b. Turkey pen trials with dietary mannan oligosaccharide, 1993-2003. Int. J. Poult. Sci. 3:179-188.

Hϋnerberg, M., S.M. Little, K.A. Beauchemin, S.M. McGinn, D. O’connor, E.K. Okine, O.M. Harstad, R. Kröbel, and T.A. McAllister. 2014. Feeding high concentrations of corn dried distillers’ grains decreases methane, but increases nitrous oxide emissions from beef cattle production. Agric. Sys. 127:19-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.005>

Kebreab, E., A. Liedke, D. Caro, S. Deimling, M. Binder, and M. Finkbeiner. 2016. Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. J. Anim. Sci. 94:2664-2681. doi:10.2527/jas2015-9036

Kerkaert, H.R., H.S. Cemin, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, K.D. Haydon, C.W. Hastad, and Z.B. Post. 2021. Improving performance of finishing pigs with added valine, isoleucine, and tryptophan: validating a meta-analysis model. J. Anim. Sci. 99:1-9. doi:10.1093/jas/skab006

Kraatz, S., J.C. Sinistore, and D.J. Reinemann. 2013. Energy intensity and global warming potential of corn grain ethanol production in Wisconsin (USA). Food Ener. Secur. 2:207-219. doi:10.1002/fes3.27

Kwon, W.B., J.A. Soto, and H.H. Stein. 2020. Effects on nitrogen balance and metabolism of branch-chain amino acids by growing pigs of supplementing isoleucine and valine to diets with adequate or excess concentrations of dietary leucine. J. Anim. Sci. 98:1-10. doi:10.1093/jas/skaa346

Kwon, W.B., K.J. Touchette, A. Simongiovanni, K. Syriopoulos, A. Wessels, and H.H. Stein. 2019. Excess dietary leucine in diets for growing pigs reduces growth performance, biological value of protein, protein retention, and serotonin synthesis. J. Anim. Sci. 2019:4282-4292. doi:10.1093/jas/skz259

LEAP. 2015. Environmental performance of animal feed supply chains: Guidelines for assessment. Livest. Environ. Assess. Perform. Partnership, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Leinonen, I., M. MacLeod, and J. Bell. 2018. Effects of alternative uses of distillery by-products on the greenhouse gas emissions of Scottish malt whisky production: A system expansion approach. Sustainability 10:1473. doi:10.3390/su10051473

Lywood, W., and J. Pinkney. 2012. An outlook on EU biofuel production and its implications for the animal feed industry. In: Biofuel Co-Products as Livestock Feed: Opportunities and Challenges, ed. H.P.S. Makkar, pp. 13-34. FAO, Rome, Italy.

Mackenzie, S.G., I. Leinonen, N. Ferguson, and I Kyriazakis. 2016a. Can the environmental impact of pig systems be reduced by utilizing co-products as feed? J. Clean. Prod. 115:172-181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.074>

Mackenzie, S.G., I. Leinonen, N. Ferguson, and I Kyriazakis. 2016b. Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact of diet formulation. Brit. J. Nutr. 115:1860-1874. doi:10.1017/S0007114516000763

Mathai, J.K., J.K. Htoo, J.E. Thomson, K.J. Touchette, and H.H. Stein. 2016. Effects of dietary fiber on the ideal standardized ileal digestible threoinine:lysine ratio for twenty-five-to-fifty-kilogram growing gilts. J. Anim. Sci. 2016.94:4217-4230. doi:10.2527/jas2016-0680

Méda, B., F. Garcia-Launay, L. Dusart, P. Ponchant, S. Espagnol, and A. Wilfart. 2021. Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: What benefits at the farm gate for pig and broiler production? Animal 15:100024. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100024>

Meul, M., C. Ginneberge, C.E. van Middelaar, I.J.M. de Boer, D. Fremaut, and G. Haesaert. 2012. Carbon footprint of five pig diets using three land use change accounting methods. Livest. Sci. 149:215-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2012.07.012>

Miguel, J.C., S.L. Rodriguez-Zas, and J.E. Pettigrew. 2004. Efficacy of a mann oligosaccharide (Bio-Mos) for improving nursery pig performance. J. Swine Health prod. 12:296-307.

NRC. 2012. Nutrient Requirements of Swine, 11th rev. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.

Ospina-Rojas, I.C., A.E. Murakami, C.R.A. Duarte, G.R. Nascimento, E.R.M Garcia, M.I. Sakamoto, and R.V. Nunes. 2017. Leucine and valine supplementation of low-protein diets for broiler chickens from 21 to 42 days of age. Poult. Sci. 96:914-922. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew319>

Oster, M., H. Reyer, E. Ball, D. Fornara, J. McKillen, K. Ulrich Sørensen, H. Damgaard Poulsen, K. Andersson, D. Ddiba, A. Rosemarin, L. Arata, P. Sckokai, E. Magowan, and K. Wimmers. 2018. Bridging gaps in the agricultural phosphorus cycle from and animal husbandry perspective – The case of pigs and poultry. Sustainability 10:1825. doi: 10.3390/su10061825

Peganova, S., and K. Eder. 2003. Interactions of various supplies of isoleucine, valine, leucine and tryptophan on the performance of laying hens. Poult. Sci. 82:100-105.

Qui, X., H. Tian, and D.A. Davis. 2017. Evaluation of a high protein distiller’s dried grains product as a protein source in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture 480:1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.07.038>

Reis, C.E.R., Q. He, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B. Hu. 2018. Effects of modified processes in dry-grind ethanol production on phosphorus distribution in coproducts. Ind. Eng. Chem. Res. 57:14861-14869. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02700>

Ringo, E., R.E. Olsen, J.L.G. Vecino, S. Wadsworth, and S.K. Song. 2012. Use of immunostimulants and nucleotides in aquaculture: A review. J. Mar. Sci. Res. Dev. 1:104.

Salyer, J.A, M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2013. Effects of standardized ileal digestible tryptophan:lysine in diets containing 30% dried distillers grains with solubles on finishing pig performance and carcass traits. J. Anim. Sci. 2013.91:3244-3252. doi:10.2527/jas2012-5502

Sauer, N., R. Mosenthin, and E. Bauer. 2011. The role of dietary nucleotides in single-stomached animals. Nutr. Res. Rev. 24:46-59.

Schweer, W., A. Ramirez, and N. Gabler. 2017. Alternatives to In-Feed Antibiotics for Nursery Pigs. XVIII Biennial Congress AMENA 2017, October 17-21, 2017, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico.

Shurson, G.C., Y.-T. Hung, J.C. Jang, and P.E. Urriola. 2021. Measures matter – Determining the true nutri-physiological value of feed ingredients for swine. Animals 11:1259. <https://doi.org/10.3390/ani1051259>

Shurson, G.C. 2018. Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses, and quantification methods. Anim. Feed Sci. Technol. 235:60-76. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.010>

Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels co-products in feeding the world sustainably. Annu. Rev. Anim. Biosci. 5:229-254.

Shurson, G.C, H.D. Tilstra, and B.J. Kerr. 2012. Impact of United States biofuels co-products on the feed Industry. In: Opportunities and Challenges in Utilizing By-products of the Biofuel Industry as Livestock Feed. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, Italy. pp. 35-60.

Siebert, D., D.R. Khan, and D. Torrallardona. 2021. The optimal valine to lysine ratio for performance parameters in weaned piglets. Animals 11:1255. <https://doi.org/10.3390/ani11051255>

Smith, T.M., A.L. Goodkind, T. Kim, R.E.O. Pelton, K. Suh, and J. Schmitt. 2017. Subnational mobility and consumption-based environmental accounting of US corn in animal protein and ethanol supply chains. PNAS 114:E7891-E7899. <https://doi.org/10.1073/pnas.1703793114>

Soares, L., N.K. Sakomura, J.C de Paula Dorigam, F. Liebert, A. Sunder, M.Q. do Nascimento, and B.B. Leme. 2019. Optimal in-feed amino acid ratio for laying hens based on deletion method. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 103:170-181. doi:10.111/jpn.13021

Soleimani, T., and H. Gilbert. 2021. An approach to achieve overall farm feed efficiency in pig production: environmental evaluation through individual life cycle assessment. The International J. LCA <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01860-3>

Spring, P., C. Wenk, A. Connolly, and A. Kiers. 2015. A review of 733 published trials on Bio-Mos®, a mannan oligosaccharide, and Actigen®, a second generation mannose rich fraction, on farm and companion animals. J. Appl. Anim. Nutr. 3:1-11.

Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. Livestock’s long shadow – environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 416 pp. <https://www.fao.org/3/A0701E/a0701e.pdf>

Stone, J.J., C.R. Dollarhide, J.L. Benning, C.G. Carlson, and D.E. Clay. 2012. The life cycle impacts of feed for modern grow-finish Northern Great Plains US swine production. Agric. Sys. 106:1-10. doi:10.1016/j.agsy.2011.11.002

Sutton, M.A., C.M., Howard, T.K., Adhya, E. Baker, J. Baron, A. Basir, W. Brownlie, C. Cordovil, W. de Vries, V. Eory, R. Green, H. Harmens, K.W. Hicks, R. Jeffrey, D. Kanter, L. Lassaletta, A. Leip, C. Masso, T.H. Misselbrook, E. Nemitz, S.P. Nissanka, O. Oenema, S. Patra, M. Pradhan, J. Ometto, R. Purvaja, N. Raghuram, R. Ramesh, N. Read, D.S. Reay, E. Rowe, A. Sanz-Cobena, S. Sharma, K.R. Sharp, U. Skiba, J.U. Smith, I. van der Beck, M. Vieno, and H.J.M. van Grinsven. 2019. Nitrogen-Grasping the Challenge. A Manifesto for Science-in-Action through the Internation Nitrogen Management System. Summary Report. Center for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.

Sutton, M.A., S. Reis, S.N. Riddick, U. Dragosits, E. Nemitz, M.R. Theobald, Y.S. Tang, C.F. Braben, M. Vieno, A.J. Dore, R.F. Mitchell, S. Wanless, F. Daunt, D. Fowler, T.D. Blackall, C. Milford, C.R. Flechard, B. Loubet, R. Massad, P. Cellier, E. Personne, P.F. Coheur, L. Clarisse, M. van Damme, Y. Ngadi, C. Clerbaux, C.A. Skjøth, C. Geels, O. Hertel, R.J.W. Kruit, R.W. Pinder, J.O. Bash, J.T. Walker, D. Simpson, L. Horváth, T.H. Misselbrook, A. Bleeker, F. Dentener, and W. de Vries. 2013. Towards a climate-dependent paradigm of ammonia emission and deposition. Phil. Trans. R. Soc. B 368:20130166.

Tallentire, C.W., S.G. Mackenzie, and I. Kyriazakis. 2018. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? J. Cleaner Prod. 187:338-347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.212>

Torrecillas, S., D. Montero, and M. Izquierdo. 2014. Improved health and growth of fish fed mannan oligosaccharides: potential mode of action. Fish Shellfish Immunol. 36:525-544.

Uwizeye, A., I.J.M. de Boer, C.I. Opio, R.P.O. Schulte, A. Falcucci, G. Tempio, F. Teillard, F. Casu, M. Rulli, J.N. Galloway, A. Leip, J.W. Erisman, T.P. Robinson, H. Steinfeld, and P.J. Gerber. 2020. Nitrogen emissions along the global livestock supply chains. Nature Food 1:437-446.

Van Middelaar, C.E., H.H.E. van Zanten, and I.J.M. de Boer. 2019. Future of animal nutrition: the role of life cycle assessment. In: Poultry and Pig Nutrition – Challenges of the 21st century, W.H. Hendriks, M.W.A. Verstegen, and L. Babinsky (eds.), Wageningen Academic Publishers, p.307-314. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-884-1_14>

Vetvicka, V., and C. Oliveira. 2014. β(1-3)(1-6)-D-glucans modulate immune status in pigs: potential importance for efficiency of commercial farming. Ann. Transl. Med. 2:16. <http://dx.doi.org/10.3928/j.issn.2305-5839.2014.01.04>.

Vetvicka, V., L. Vannucci, and P. Sima. 2014. The effects of β-glucan on pig growth and immunity. Open Biochem. J. 8:89-93.

Vohra, A., P. Syal, and A. Madan. 2016. Probiotic yeasts in livestock sector. Anim. Feed Sci. Technol. 219:31-47.

Waldroup, P.W., J.H. Kersey, and C.A. Fritts. 2002. Influence of branched-chain amino acid balance in broiler diets. International J. Poult. Sci. 1:136-144.

Wellington, M.O., J.K. Htoo, A.G. van Kessel, and D.A. Columbus. 2018. Impact of dietary fiber and immune system stimulation on threonine requirement for protein deposition in growing pigs. J. Anim. Sci 2018.96:5222-5232. doi:10.1093/jas/sky381

Werth, S.J., A.S. Rocha, J.W. Oltjen, E. Kebreab, F.M. Mitloehner. 2021. A life cycle assessment of the environmental impacts of cattle feedlot finishing rations. The Intl. J. Life Cycle Assess. 26:1779-1793. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01957-3>

Yang, Z., A. Palowski, J.-C. Jang, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination, comparison, and prediction of digestible energy, metabolizable energy, and standardized ileal digestibility of amino acids in novel maize co-products and conventional dried distillers grains with solubles for swine. Anim. Feed Sci. Technol. 282:115149. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115149>

Zheng, L., H. Wei, C. Cheng, Q. Xiang, J. Pang, and J. Peng. 2016. Supplementation of branched-chain amino acids to a reduced-protein diet improves growth performance in piglets: involvement of increased feed intake and direct muscle growth-promoting effect. Brit. J. Nutr. 115:2236-2245. doi:10.1017/S0007114516000842